

П. Г. Круковский, М. А. Метель, Д. И. Скляренко, А. С. Полубинский

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03057, Украина

МОДЕЛЬ ТЕПЛОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО, ВЛАЖНОСТНОГО И РАДИАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ И МОНИТОРИНГА НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА И ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

Обосновывается необходимость детального анализа и прогнозирования сопряженных процессов газодинамического, теплового и радиационного состояния объекта «Укрытие» и нового безопасного конфайнмента (НБК), а также его влажностного состояния, определяющего 100-летний срок службы несущих конструкций в кольцевом пространстве НБК. Для проведения анализа и прогнозирования этих процессов была разработана трехмерная компьютерная CFD (Computational Fluid Dynamic) модель, которая позволила проверить работоспособность системы вентиляции НБК при различных климатических условиях и отказах вентиляционного оборудования. Приводятся примеры применения модели для анализа распространения радиоактивных аэрозолей, выходящих из объекта «Укрытие» в основной объем НБК и окружающую среду как в период ввода НБК в эксплуатацию, так и в процессе эксплуатации. Рассматриваются возможности использования разработанной модели в составе постоянно действующего мониторинга детального анализа и прогнозирования газодинамического, теплового, влажностного и радиационного состояния НБК.

Ключевые слова: новый безопасный конфайнмент, теплое, влажностное, радиационное состояние, CFD моделирование, мониторинг состояния

Новый безопасный конфайнмент (НБК) является защитным сооружением, включающим в себя оборудование для извлечения из разрушенного 4-го энергоблока ЧАЭС материалов, содержащих ядерное топливо, обеспечения безопасности персонала, населения и окружающей среды, и преобразования разрушенного энергоблока в экологически безопасную систему. Срок выполнения этих задач может растянуться на многие десятилетия, поэтому одним из главных требований к НБК при проектировании было требование обеспечения ресурса его работы не менее 100 лет [1, 2].

Для выполнения этого требования компания-подрядчик проектирования и строительства НБК - консорциум VINCI Construction Grands Projets/ Bouygues Travaux Publics NOVARKA предложил два важных концептуальных решения: 1 - форма НБК при необходимых размерах $250 \times 160 \times 100$ м может быть выполнена в виде «Арки»; 2 - несущим материалом такой арки может быть только металл. Вслед за этими решениями возникло третье - для удовлетворения 100-летнего ресурса работы НБК необходимо также обеспечить коррозионную устойчивость несущих металлических конструкций (труб диаметром от 0,4 до 1 м) в кольцевом пространстве (рис. 1, а), что возможно при условии поддержания уровня влажности воздуха вокруг труб не более 40 %. Для обеспечения последнего требования воздушное кольцевое пространство с несущими металлическими конструкциями было заключено между двумя металлическими оболочками (см. рис. 1, а, поз. 2 и 3).

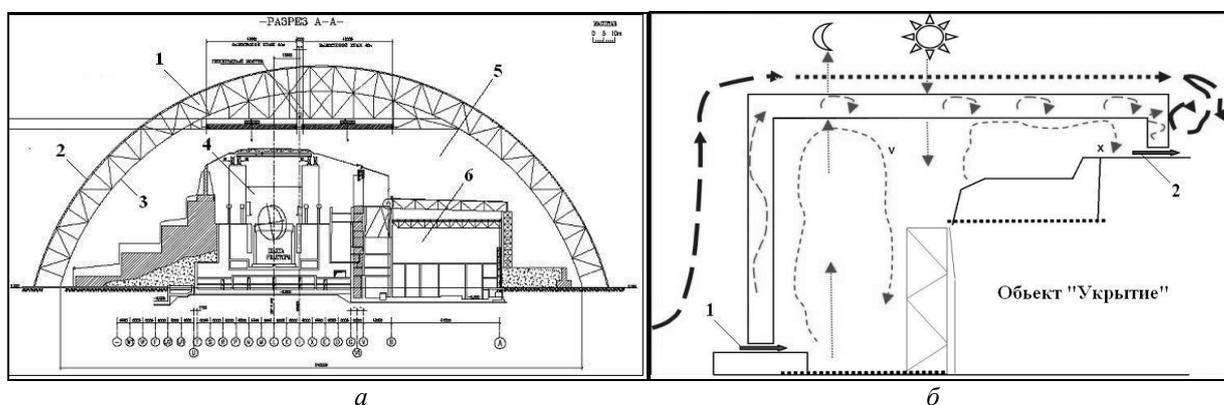


Рис. 1. Схемы объекта «Укрытие» и НБК в поперечном (а) и продольном (б) сечениях.

На рис. 1, а: 1 - стальные конструкции и кольцевое пространство «Арки» НБК; 2 - наружная оболочка; 3 - внутренняя оболочка; 4 - объект «Укрытие»; 5 - основной объем НБК; 6 - машинный зал.

© П. Г. Круковский, М. А. Метель, Д. И. Скляренко, А. С. Полубинский, 2019

Кроме этого, для предотвращения попадания радиоактивных аэрозольных выбросов в окружающую среду при демонтаже конструкций объекта «Укрытие» были приняты еще два концептуальных требования: необходимо в кольцевом пространстве НБК поддерживать избыточное давление воздуха на уровне 50 Па, а в основном объеме - отрицательное, на уровне минус 5 Па. Для этого была спроектирована специальная система осушения и рециркуляции воздуха в кольцевом пространстве и вентиляции в основном объеме НБК.

Следует отметить важный факт влияния климатических условий (температуры, влажности, а также скорости и направления обтекаемого наружного воздуха) на тепловлажностное и радиационное состояние НБК, поскольку внешняя и внутренняя оболочки, а также специальные мембраны, закрывающие зазоры между вертикальными стенами НБК и строительными конструкциями, не являются полностью герметичными. Протечки через оболочки и мембраны со временем будут увеличиваться. На рис. 1, б стрелками показан пример движения воздушных потоков при западном ветре, где 1 - направление входа воздуха в основной объем НБК через мембраны западной стены, 2 - направление выхода воздуха из НБК через мембраны восточной стены, а влажные потоки воздуха, обтекающие НБК, могут проникать и выходить из различных частей кольцевого пространства в зависимости от распределения давлений на внешней оболочке НБК при различных направлениях и силе ветра.

Под НБК находится объем около 3 млн м³, который разделяется примерно на три части между объемами кольцевого и основного пространства, а также объекта «Укрытие». В таких больших объемах распределение полей температур, влажностей и радиоактивных аэрозолей (РА) будет неравномерным и нестационарным вследствие сложных и взаимосвязанных между собой указанных выше физических процессов.

Так температурно-влажностный режим основного объема НБК формируется за счет:

- 1) метеорологических условий окружающей среды: температура, влажность, сила и направление ветра;
- 2) лучисто-конвективного теплообмена поверхностей наружной оболочки с окружающей средой, внутренней оболочки НБК со строительными конструкциями объекта «Укрытие» и обеих оболочек между собой и конструкционными трубами кольцевого пространства;
- 3) длительного нестационарного теплообмена массивных бетонных конструкций объекта «Укрытие», металлических конструкций НБК и воздуха основного объема НБК с грунтом и фундаментами, на которых расположен НБК на глубину 15 м в течение дневных, месячных и годовых циклов;
- 4) источников тепловыделения в объекте «Укрытие» и НБК;
- 5) смешения поступающего осушенного воздуха с имеющимся в кольцевом пространстве и его воздухообменом с окружающей средой и основным объемом через неплотности оболочек НБК;
- 6) нагнетания и удаления воздуха в/из основного объема НБК.

Поскольку влажностный режим воздушных объемов НБК напрямую зависит от температурного и газодинамического режимов в этих объемах, то для детального анализа работоспособности системы вентиляции НБК необходима разработка метода, способного выполнить такой анализ. В качестве такого метода по заданию консорциума НОВАРКА было выбрано трехмерное CFD (Computational Fluid Dynamic) компьютерное моделирование, которое позволило проверить и уточнить работоспособность системы вентиляции и осуществить анализ и прогнозирование состояния НБК при различных климатических условиях и отказах инженерного оборудования.

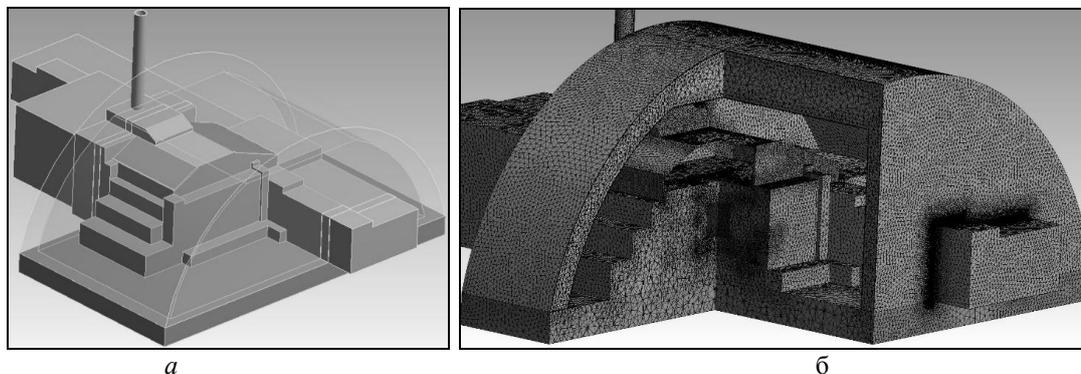


Рис. 2. Части геометрической (а) и сеточной моделей НБК (б) и всех объектов под ней, включая объект «Укрытие», грунты и фундаменты.

Для выполнения работы была создана трехмерная CFD-модель, включающая в себя все основные части НБК и объекта «Укрытие», включая грунты и фундаменты (рис. 2). Как указывалось выше, разработанная модель учитывала на внешней оболочке НБК естественные условия радиационно-конвективного теплообмена с внешней средой и условия воздухообмена с внешней средой через оболочки при различных направлениях и силе ветра, обтекающего НБК (см. рис. 1, б). Между всеми твердыми поверхностями НБК, объекта «Укрытие», поверхностью земли и воздухом, обтекающим эти поверхности, задавались условия конвективного теплообмена. Воздухо- и влагообмен между основным объемом и окружающей средой осуществлялся посредством учтенных в модели системы вентиляции и протечек воздуха и влаги из окружающей среды через мембраны НБК. Величина этих протечек также зависит от направления и силы ветра, обтекающего НБК. Влияние земли и фундаментов учитывалось посредством включения в основную модель области дополнительной геометрии со своей расчетной сеткой, охватывающей грунт и фундаменты под «Аркой» НБК на глубину 15 м (см. рис. 2). Температура грунта на глубине 15 м стабильная и принималась равной 10 °С.

Разработанная и кратко описанная выше модель термогазодинамических и влажностных процессов в воздушных объемах НБК, во всех строительных конструкциях объекта «Укрытие», фундаментах и грунтах под ними была использована для детального анализа распределения температур и влажности в кольцевом и основном объемах НБК и объекта «Укрытие» при различных метеорологических условиях в стационарных и нестационарных режимах, а также прогнозировании тепловлажностного состояния объекта «Укрытие» и НБК при отказах различных частей вентиляционного оборудования. На рис. 3 приведен пример такого распределения температур и влажности в кольцевом и основном объемах НБК и объекта «Укрытие» при стационарном режиме в летнее время при температуре окружающего воздуха 30 °С, относительной влажности 100 % и отсутствии ветра.

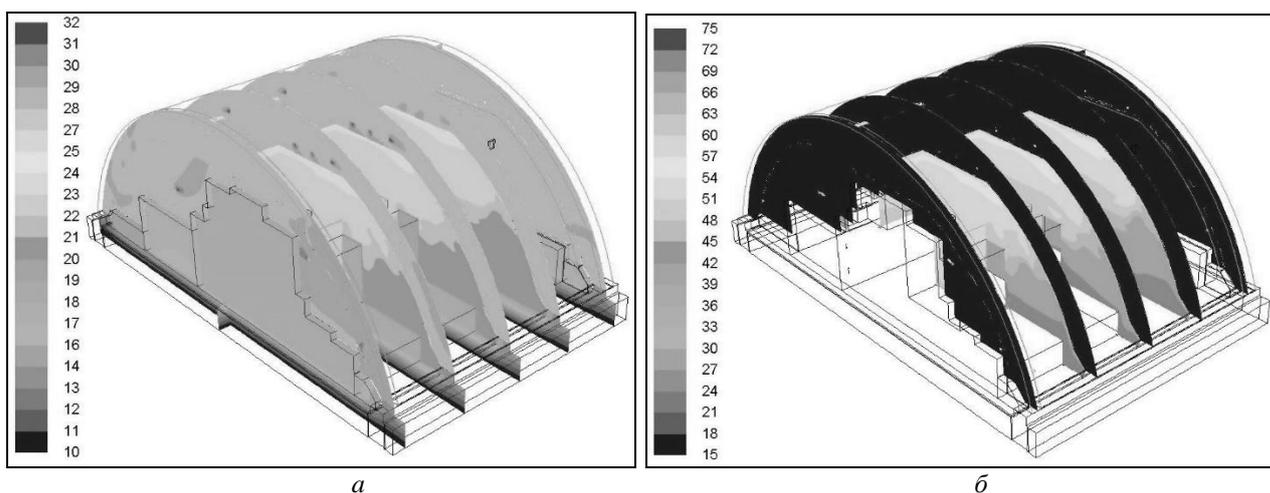


Рис. 3. Распределения температур (а) и влажности (б) в кольцевом и основном объемах объекта «Укрытие» и НБК.

Проведенные исследования показали, что система вентиляции в целом работоспособна в диапазоне заданных климатических условий с изменением температуры окружающего воздуха от -22 до +30 °С, относительной влажности от 50 до 100 % и силе ветра от 0 до 25 м/с. Временное превышение уровня влажности в кольцевом пространстве наблюдалось лишь при силе ветра, превышающей 7,2 м/с.

Рассмотренная модель позволила также проводить анализ распространения РА из объекта «Укрытие» в основной объем НБК и окружающее пространство. Примеры распространения РА в объекте «Укрытие», НБК и окружающей среде как в период ввода НБК в эксплуатацию, так и в процессе эксплуатации приведены на рис. 4.

Анализ движения радиоактивной пыли в основном объеме НБК и возможных выбросов в окружающую среду через протечки в мембранах, герметизирующих зазоры между вертикальными стенами НБК и строительными конструкциями под ними, особенно важен во время демонтажа конструкций объекта «Укрытие» и обращения с радиоактивными отходами.

Поэтому одной из задач является постоянный анализ распределения объемной концентрации РА в основном объеме НБК для прогнозирования воздействия РА на персонал при эксплуатации комплекса НБК-ОУ и демонтаже нестабильных конструкций объекта «Укрытие», крыша и стены

которого имеют большое количество щелей и неплотностей, через которые РА будут проникать в воздух и основной объем НБК, а оттуда определенная часть в окружающую среду (см. рис. 4). Из-за перепадов температур внутри объекта «Укрытие» и НБК, которые зависят от времени года, возникают нестационарные термогазодинамические процессы тепловой конвекции и неравномерного движения воздуха, которые приводят к неравномерному распространению РА в основном объеме НБК.

Лучше всего эти процессы описываются рассмотренной выше CFD-моделью, что дает возможность получать распределение значений этих параметров по всему объему НБК в составе системы мониторинга состояния НБК (рис. 5). Это также дает возможность предсказать достижение критических значений параметров (повышенные влажность в кольцевом пространстве или концентрации РА в основном объеме) и определить необходимые решения для предотвращения возникновения внештатных ситуаций.

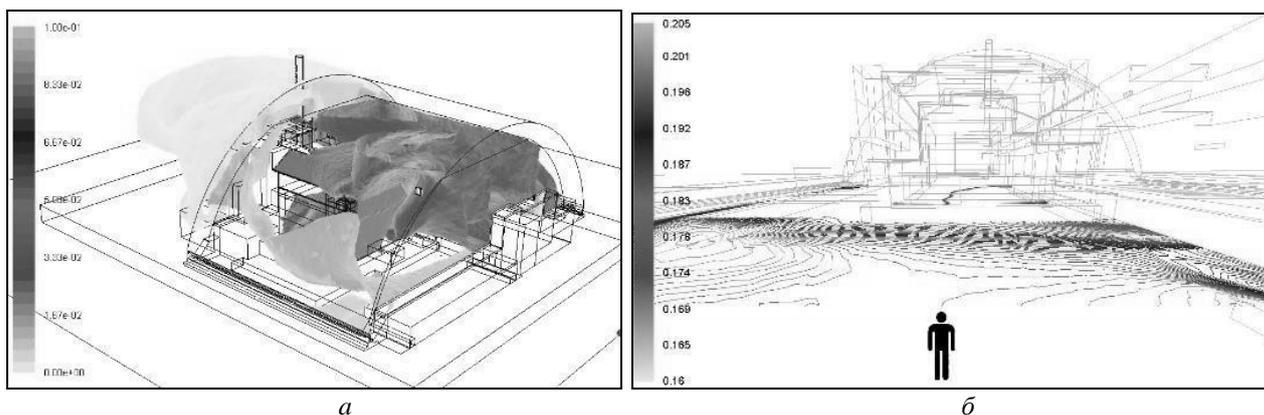


Рис. 4. Распределение концентрации РА (Бк/м³) внутри и снаружи НБК на этапе его ввода в эксплуатацию (а) и изолинии концентраций РА внутри НБК на высоте 1,5 м от земли в районе возможной деятельности персонала.

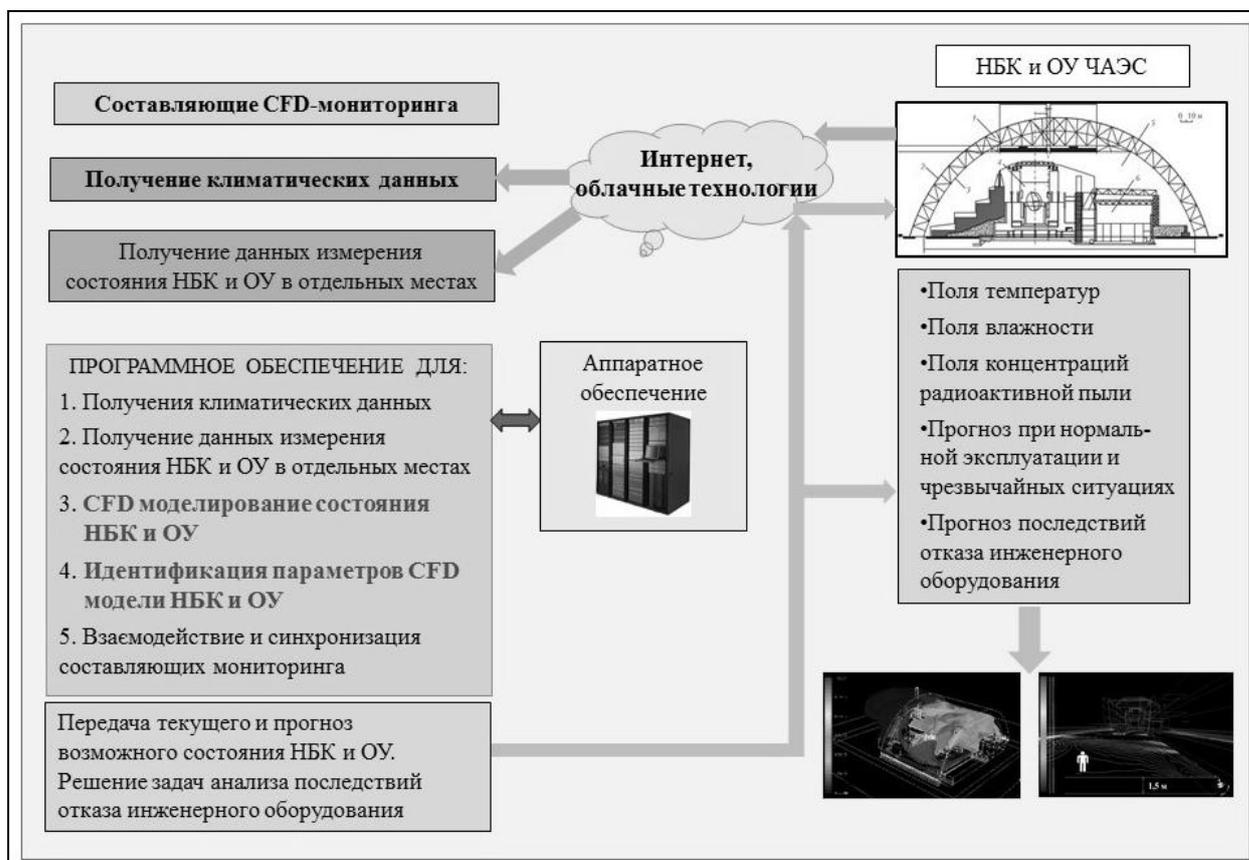


Рис. 5. Схема взаимодействия составляющих системы CFD-мониторинга состояния НБК и объекта «Укрытие» между собой и через интернет.

Можно сформулировать следующие требования к такой системе мониторинга состояния НБК:

1. Наличие CFD-модели объекта, детально описывающей состояние объекта.
2. Взаимодействие CFD-модели с измеряемыми параметрами объекта.
3. Наличие процедуры идентификации параметров модели по данным измерений в отдельных точках объекта.
4. Использование CFD-модели объекта для прогнозирования состояний НБК и объекта «Укрытие», например предсказание возможных аварийных ситуаций.
5. Работа CFD-модели в автоматическом режиме в режиме реального времени.

На рис. 5 приведена предлагаемая схема взаимодействия составляющих системы мониторинга радиационной обстановки в НБК и объекта «Укрытие». Такой мониторинг авторы назвали CFD-мониторингом, поскольку он основан на использовании CFD-моделей.

Как видно из рисунка, мониторинг материально состоит из двух частей - программного и аппаратного обеспечения. Для его функционирования кроме этих двух частей необходимо наличие обмена данными (через интернет) между НБК и системой мониторинга.

Выводы

Обоснована необходимость детального анализа и прогнозирования сопряженных физических процессов газодинамического, теплового, влажностного и радиационного состояния объекта «Укрытие» и НБК. Разработана трехмерная компьютерная CFD-модель для детального анализа и прогнозирования состояния НБК, позволившая проверить работоспособность системы вентиляции НБК при различных климатических условиях и отказах вентиляционного оборудования, а также провести анализ распространения РА, выходящих из объекта «Укрытие» в основной объем НБК и окружающую среду как в период ввода НБК в эксплуатацию, так и в процессе эксплуатации. Рассмотрены возможности использования разработанной модели в составе постоянно действующего мониторинга детального анализа и прогнозирования газодинамического, теплового, влажностного и радиационного состояния НБК на протяжении 100-летнего срока его эксплуатации.

Работа выполнялась при финансовой поддержке консорциума VINCI Construction Grands Projets/Bouygues Travaux Publics Novarka, Национальной академии наук Украины и научной программы НАТО «Наука во имя мира и безопасности».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *SIP-P-PM-21-330-TOR-001-01*. Техническое задание на разработку Концептуального проекта (ТЭО) безопасности конфайнмента. – 2001.
2. *Проектные критерии и требования к новому безопасному конфайнменту для объекта «Укрытие»* / М. Врона, Ф. Конвер, Е. Шмидан, Ю. И. Немчинов, В. Я. Шендерович, В. Н. Щербин // Тези доп. VI конф. Міжнар. чорноб. центру. – 9 - 12 вересня 2003 р., м. Славутич, Україна. – С. 124 – 127.

П. Г. Круковский, М. А. Метель, Д. И. Скляренко, А. С. Полубинский

Институт технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

МОДЕЛЬ ТЕПЛОГАЗОДИНАМІЧНОГО, ВОЛОГІСНОГО І РАДІАЦІЙНОГО СТАНУ ТА МОНІТОРИНГУ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТА І ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

Обґрунтовується необхідність детального аналізу і прогнозування пов'язаних процесів газодинамічного, теплового та радіаційного стану об'єкта «Укриття» і нового безпечного конфайнмента (НБК), а також їхнього вологісного стану, що визначає 100-річний термін служби несучих конструкцій у кільцевому просторі НБК. Для проведення аналізу та прогнозування цих процесів була розроблена тривимірна комп'ютерна CFD (Computational Fluid Dynamic) модель, що дало змогу перевірити працездатність системи вентиляції НБК при різних кліматичних умовах і відмовах вентиляційного обладнання. Наводяться приклади застосування моделі для аналізу поширення радіоактивних аерозолів, що виходять з об'єкта «Укриття» в основний об'єм НБК і навколишнє середовище як у період введення НБК в експлуатацію, так і в процесі експлуатації. Розглядається можливість використання розробленої моделі у складі постійно діючого моніторингу детального аналізу і прогнозування газодинамічного, теплового, вологісного і радіаційного стану НБК.

Ключові слова: новий безпечний конфайнмент, тепловий, вологісний, радіаційний стан, CFD-моделювання, моніторинг стану.

P. G. Krukovskiy, M. A. Metel, D. I. Sklyarenko, A. S. Polubinsky

Institute of Technical Thermophysics, NAS of Ukraine, Zhelyabova str., 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

MODEL OF THERMAL, GASDYNAMIC, HUMIDITY AND RADIATION STATE AND MONITORING OF THE NEW SAFE CONFINEMENT AND THE «SHELTER» OBJECT

This paper justifies the necessity for detailed analysis and forecasting of the associated gas-dynamic, thermal and radiation state of the Shelter Object (OS) of the New Safe Confinement (NSC), as well as its moisture state, which determines the 100-year life time of the supporting structures in the NSC annular space. To analyze and predict these processes, a three-dimensional computer CFD (Computational Fluid Dynamic) model was developed, which allowed to test the performance of the NSC ventilation system under various climatic conditions and ventilation equipment failures. Examples are given of applying the model to the analysis of the distribution of radioactive aerosols leaving the OS into the main volume of the NSC and the environment both during the NSC commissioning period and during operation. The possibilities of using the developed model as part of the ongoing monitoring of detailed analysis and forecasting of the gas-dynamic, thermal, humidity and radiation state of the NSC are considered. CFD model «Shelter» object and NSC. One of the methods for analyzing and prediction the behavior of processes within an «Shelter» object is computer CFD modeling (Computational Fluid Dynamics), which makes it possible to predict the distribution of temperatures, humidity, air velocities and other values, such as concentrations of impurities or phases. A set of methodological and software approaches and technologies were applied which allowed the model to take into account main physical processes and features of the structure and geometry of the NSC and the «Shelter» object for analysis, prediction and monitoring of humidity and radioactive aerosol distribution processes in the «Shelter» object and the NSC. Approach to radioactive aerosol modeling. Radioactive aerosols in the model are presented as one of the phases of a multiphase medium, taking into account the processes of their transfer with air streams, due to diffusion, including turbulent, RA emissions from the central hall of the Shelter and their gradual subsidence under the action of gravity. As a result, the developed model can be included in the permanent monitoring system of the NSC and the «Shelter» object as a so-called “digital twin NSC”, which allows the NSC to analyze and predict its state and refine the operational parameters in various normal and abnormal situations throughout the life of the NSC.

Keywords: new safe confinement, thermal, humidity, radiation state, CFD modeling, state monitoring

REFERENCES

1. *SIP-P-PM-21-330-TOR-001-01*. Terms of Reference for the development of a Conceptual Project (TEO) for confinement security. – 2001. (Rus)
2. *Design criteria and requirements for a new safe confinement for the object "Shelter"* / M. Vrona, F. Conner, E. Schmidman, Yu. I. Nemchinov, V. Ya. Shenderovich, V. N Shcherbin. // Thesis papers VI confer. International Chernobyl Center, 9 – 12 September 2003, Slavutych, Ukraine. – P. 124 – 127. (Rus)

Надійшла 14.12.2018

Received 14.12.2018